

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ НА ИЗМЕНЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

¹д. т. н., профессор Кружилка О. Е.,
²д. т. н., профессор Березуцкий В. В.,
³к. т. н., доцент Березуцкая Н. Л.,
⁴Халиль В. В.

Украина

¹м. Киев, Национальный институт охраны труда

²м. Харьков, Национальный технический университет «ХПИ»

³м. Харьков, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

⁴м. Харьков, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. М. Бекетова

Abstract. The technological liquids for lubricating and cooling (LCTL) are widely used in production in the processes of cutting, drilling, grinding and other processing of metal products. According to their composition, LCTL are a nutrient medium for the development of microorganisms. The study of these processes and the development of technologies and equipment is a difficult task. Successful scientific developments made by scientists allowed to create technologies that prevent the destruction of LCTL from the influence of an aggressive environment, extend the service life to a year or more, and improve the sanitary and hygienic parameters of the working area. The article considers the research that allowed one to determine the mathematical model of the process and the effect of the temperature indices of the working medium on the growth rate of microorganisms on one of the types LCTL as of the Aquol.

Keywords: water, technological liquids, temperature, microorganisms, working area, sanitary and hygienic parameters.

Введение. Одним из основных вопросов современного производства является его экологизация, что связано с совершенствованием существующих, и созданием новых технологических процессов, которые более полно удовлетворяют принципу не нарушения экологического равновесия. Основным направлением экологизации производств является разработка и научное обоснование новых технологических процессов, оптимизация потребления природных ресурсов, их комплексное и многократное использование [1,2]. При этом, одной из основных задач является создание таких технологических процессов, которые более подобны естественным природным замкнутым круговоротам химических веществ в биосфере. Основу экологизации составляют малоотходные, энерго- и ресурсосберегающие технологии.

В воздухе производственной зоны находятся разнообразные вещества (дым, сажа, минеральная и органическая пыль, капельки воды и других жидкостей). Распыленные СОТС могут быть отнесены к категории аэрозолей. При переходе 1г жидкости в распыленное состояние образуется высокодисперсная смесь с воздушной средой и жидкой дисперсной фазой, состоящей из одного миллиарда капель со средним размером от 12 до 25 мкм и средним расстоянием между каплями, превышающим их 25 диаметров [3]. При этом в сотни раз увеличивается удельная поверхность жидкости. Большая проникающая способность распыленных частиц СОТС представляет угрозу обслуживающему персоналу, а выбросы в окружающую среду – населению.

Особенно высокую опасность представляет распыляемая жидкость, которая поражена микроорганизмами. Микроорганизмы, развивающиеся в СОТС, а также саму загрязненную жидкость (как и отходы, извлекаемые из нее при использовании) можно отнести к техногенной побочной "продукции", производимой в процессе своей деятельности предприятиями. Эта техногенная побочная "продукция" представляет опасность для окружающей природной среды ввиду отсутствия или неэффективности средств ее очистки, обезвреживания, обеззараживания и утилизации. В связи с необходимостью обеспечения нормальных экологических условий при работе с распыленными жидкостями, которые определяются гигиеническими требованиями, главной задачей является поддержание концентрации аэрозолей и примесей, в том числе

микроорганизмов в них, на уровне, не выше допустимого – в зоне дыхания работающих и в цеху в целом. Если принять условие, что струя распыленной СОТС до встречи с препятствием распространяется на расстояние 500 мм, то, как следует из литературы [4-7], она приводит в движение около $900 \text{ nm}^3/\text{ч}$ окружающего воздуха.

Цель исследований – установить зависимость влияния температурных параметров рабочей зоны на изменение биологических показателей технологических сред.

Приборы и оборудование. Исследования выполнялись на протяжении года в условиях приближенных к промышленным условиям. Объектом исследований была водная технологическая среда, приготовленная по ТУ на СОТС Аквол. Технологическая среда заливалась в станок, который выполнял одну и ту же технологическую операцию – нарезка резьбы. Металл – сталь Ст3. СОТС Аквол работала с перерывом в 45 минут, на протяжении одной рабочей смены – 8 часов.

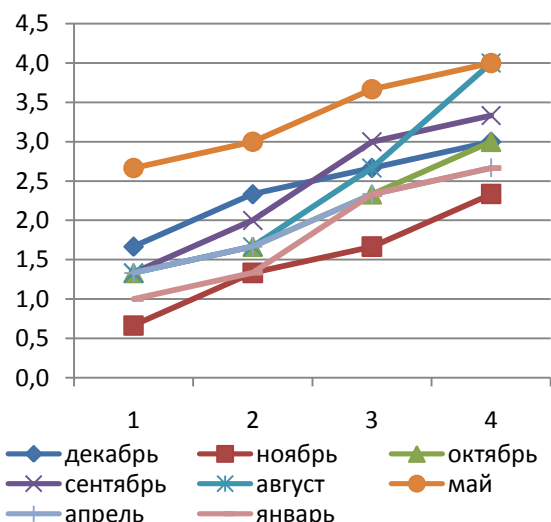


Рис. 1. Зависимость изменения биологических факторов

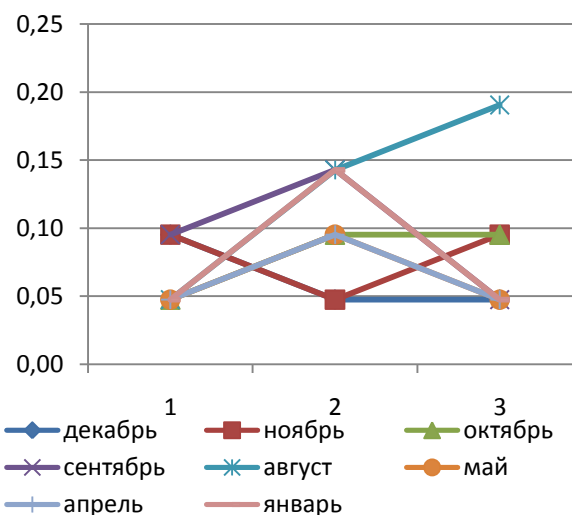
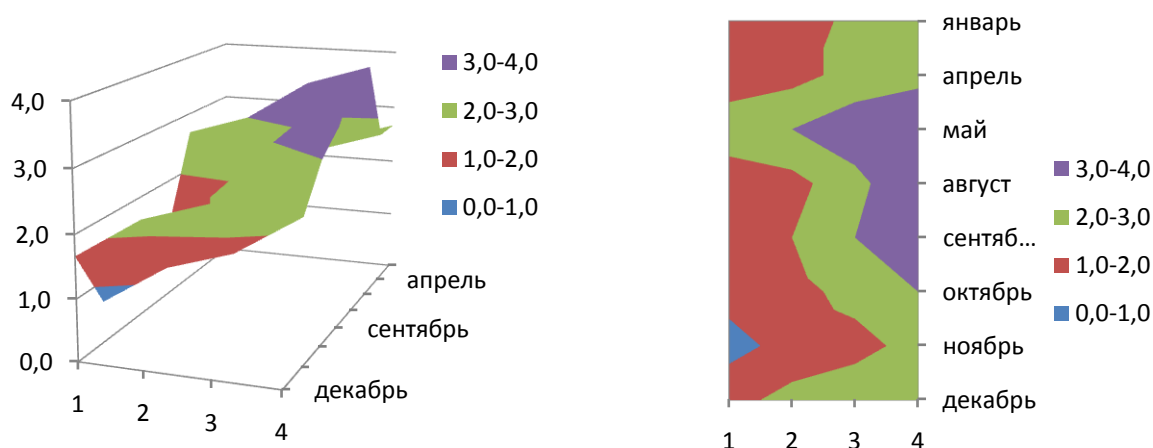


Рис. 2. Изменение градиента прироста бактерий в баллах за неделю

Анализируя данные, приведенные на рисунках 1 и 2, можно сделать вывод, что в холодный период года биологическая активность СОТС уменьшается, что характеризует градиент скорости прироста бактерий за неделю. В некоторые моменты он даже снижается. В теплый период года, наблюдается стабильный рост бактерий и соответственно возрастающий градиент прироста бактерий за неделю. Если представить указанные зависимости в виде поверхности, то на ней хорошо видны области, где преобладают повышенные и пониженные (в баллах) зоны, которые определяются временем года и температурными режимами в рабочей зоне.



а) объемная поверхность распределения баллов б) плоская поверхность распределения баллов
Рис. 3. Поверхности распределения баллов СОТС на протяжении года

Математическая модель данных ряда. Исходные данные для расчета приведены на рисунке 4.

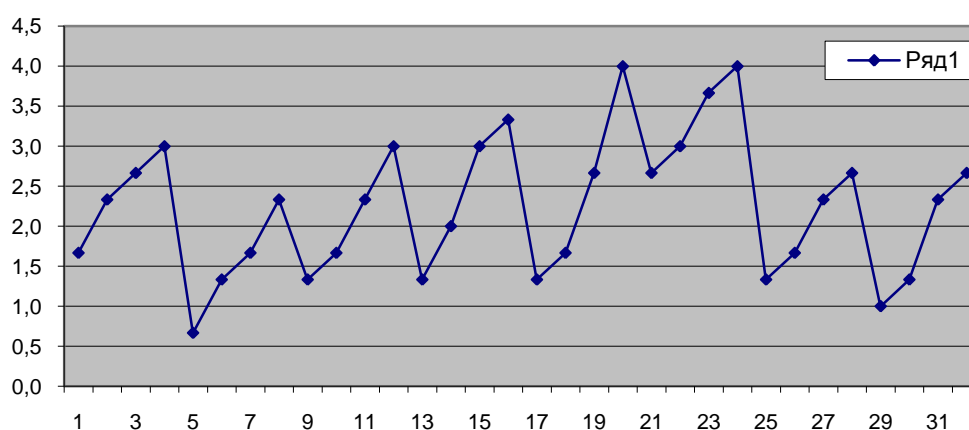


Рис. 4. Исходные данные для расчета математической модели

Принята следующая аддитивная модель данных исходного ряда $x(t)$:

$$x(t) = f(t) + \varphi(t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $f(t)$ - непериодическая (трендовая) составляющая временного ряда; $\varphi(t)$ - циклическая, периодическая составляющая ряда; $\varepsilon(t)$ - случайная составляющая ряда данных.

Определение $f(t)$. Непериодическую составляющую, которая определяет тенденцию в изменении данных, называют *трендом*. Легче всего тренд строить в виде многочлена (полинома). Порядок многочлена достаточно выбрать третьим или четвертым [8-10].

1) Аппроксимация полиномом третьего порядка.

В каждой точке экспериментальных данных считаем, что

$$x_i(t) = \theta_0 + \theta_1 \cdot t + \theta_2 \cdot t^2 + \theta_3 \cdot t^3 + \varepsilon(t), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где θ_j , $j = 1, 2, 3$ - коэффициенты, подлежащие определению; t - время; $\varepsilon(t)$ - погрешности; $n = 30$ - количество точек измерения.

Коэффициенты θ_i определяются методом наименьших квадратов:

$$\varepsilon^2(t) = \sum_{k=1}^n (x_k - \theta_0 - \theta_1 t - \theta_2 t^2 - \theta_3 t^3) = F(\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_3) \xrightarrow{\theta_i} \min. \quad (2)$$

Минимизация функционала (2) приводит к системе линейных алгебраических уравнений:

$$\frac{\partial F(\theta_0, \dots, \theta_4)}{\partial \theta_i} = 0, \quad i = \overline{1, 3} \quad (3)$$

Систему уравнений (3) удобно решать в матричном виде.

Введем матрицы:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 \\ 1 & t_2 & t_2^2 & t_2^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_n & t_n^2 & t_n^3 \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}; \quad \Theta = \begin{pmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{pmatrix}.$$

Тогда коэффициенты регрессии θ_j , $j = 1, 2, 3$ найдутся из соотношения

$$\Theta = (T^T \cdot T)^{-1} \cdot T^T \cdot X. \quad (4)$$

Расчеты показали:

$$\theta = \begin{pmatrix} 2.239 \\ -0.143 \\ 0.017 \\ -4.343 \times 10^{-4} \end{pmatrix}.$$

$$f(t) = 2,239 - 0,143 \cdot t + 0,017 \cdot t^2 - 0,0004343 \cdot t^3. \quad (5)$$

Погрешность вычислений (сумма квадратов отклонений от опытных данных, см. (2))

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^i \varepsilon_i^2(t)} = 0,801. \quad (6)$$

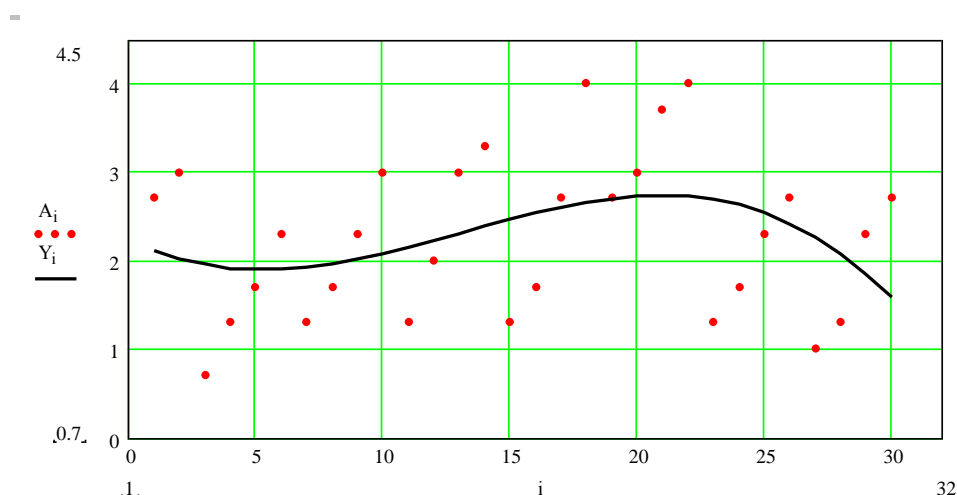


Рис. 5. Экспериментальные точки и теоретические кривые к формуле (5) - полином третьего порядка

На графике красным обозначены точки экспериментальных данных, Y_i - теоретическая кривая по формуле (5), по оси абсцисс $i = 1, 2, \dots, n$ - время.

2) Аппроксимация полиномом четвертого порядка.

В каждой точке экспериментальных данных считаем, что

$$x_i(t) = \theta_0 + \theta_1 \cdot t + \theta_2 \cdot t^2 + \theta_3 \cdot t^3 + \theta_4 \cdot t^4 + \delta(t), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где θ_j , $j = 1, 2, 3, 4$ - коэффициенты, подлежащие определению; t - время; $\delta(t)$ - погрешности; n - количество точек измерения.

Коэффициенты θ_i также определяются методом наименьших квадратов:

$$\delta^2(t) = \sum_{k=1}^n (x_k - \theta_0 - \theta_1 t - \theta_2 t^2 - \theta_3 t^3 - \theta_4 t^4) = F(\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_4) \xrightarrow{\theta_i} \min. \quad (7)$$

Минимизация функционала (7) приводит к системе уравнений:

$$\frac{\partial F(\theta_0, \dots, \theta_4)}{\partial \theta_i} = 0, \quad i = \overline{1, 5}. \quad (8)$$

Систему уравнений (8) удобно решать в матричном виде.
Введем матрицы:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 & t_1^3 & t_1^4 \\ 1 & t_2 & t_2^2 & t_2^3 & t_2^4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & t_n & t_n^2 & t_n^3 & t_n^4 \end{pmatrix}; \quad X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}; \quad \Theta = \begin{pmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{pmatrix},$$

Тогда коэффициенты регрессии θ_j , $j=1,2,3,4$ найдутся из соотношения (4)
Расчеты показали:

$$\theta = \begin{pmatrix} 3.511 \\ -0.859 \\ 0.117 \\ -5.397 \times 10^{-3} \\ 8.004 \times 10^{-5} \end{pmatrix}.$$

$$f(t) = 3,511 - 0,859 \cdot t + 0,117 \cdot t^2 - 0,000539 \cdot t^3 - 0,0008 \cdot t^4. \quad (9)$$

Погрешность вычислений (сумма квадратов отклонений от опытных данных, см. (7))

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2(t)} = 0,719. \quad (10)$$

На графике красным обозначены точки экспериментальных данных, черным - Y_i теоретическая кривая по формуле (5), по оси абсцисс $i=1,2,\dots,n$ - время. Так как в данном случае погрешность меньше, то принимается модель полинома четвертого порядка.

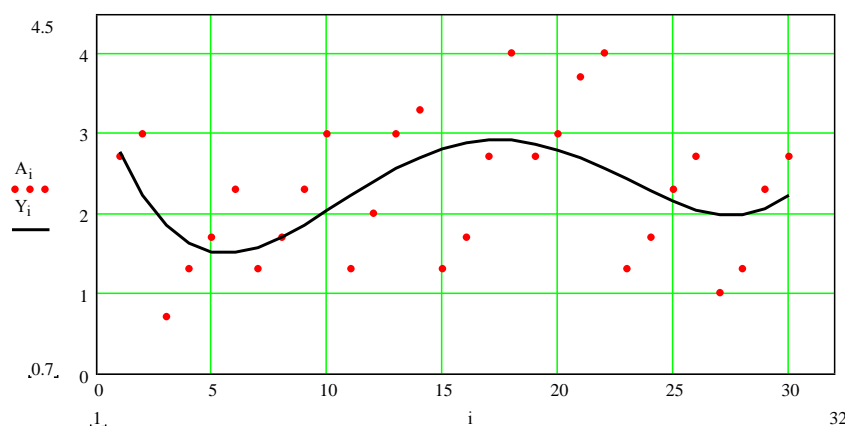


Рис. 6. Экспериментальные точки и теоретические кривые к формуле (5) - полином четвёртого порядка

Определение $\phi(t)$. Вычтем из исходного ряда (1) составляющую $f(t)$, получим:

$$\phi(t) = x(t) - f(t) + \varepsilon(t). \quad (11)$$

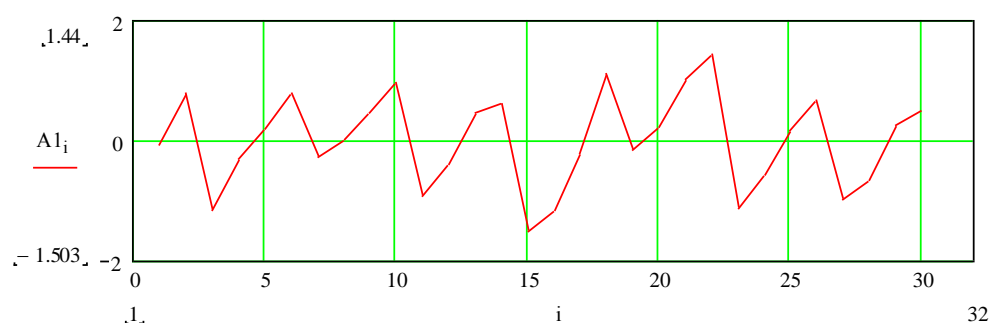


Рис. 7. График остатков $\phi(t)=x(t)-f(t)$ имеет вид ($Al_i = \phi(t)$, $i=t$)

Так как вид данной зависимости близок к периодическому, то целесообразно аппроксимировать ее тригонометрическим полиномом (несколькими слагаемыми ряда Фурье):

$$\phi(t) = C_0 + \sum_{k=1}^N \left(\alpha_k \cdot \sin \frac{k\pi \cdot t}{L} \right) + \sum_{k=1}^N \left(\beta_k \cdot \cos \frac{k\pi \cdot t}{L} \right), \quad (12)$$

где L - длина интервала аппроксимации ряда, в данном случае это время, на котором задан ряд; N - число оставляемых в разложении гармоник; t - текущий момент времени.

Коэффициенты ряда определяются (**численно!**) по формулам:

$$\alpha_k = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N \left[\phi_j(t) \cdot \cos \left(\frac{2\pi \cdot j}{N} k \right) \right]; \quad \beta_k = \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N \left[\phi_j(t) \cdot \sin \left(\frac{2\pi \cdot j}{N} k \right) \right]; \quad C_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \phi_j(t);$$

$$k = \overline{1, L}, \quad (13)$$

где L - количество оставляемых гармоник (порядок аппроксимации).

Найденные значения коэффициентов (первые 14) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Найденные значения коэффициентов по формуле 13

T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
α	0.011	-0.245	0.334	0.024	0.096	0.099	0.455	-0.302	-0.123	-0.078	-0.027	-0.019	-0.018	$4.352 \cdot 10^{-3}$
T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
β	-0.015	0.116	0.024	-0.138	0.227	0.074	0.385	-0.471	-0.108	$6.684 \cdot 10^{-3}$	-0.135	-0.109	-0.049	$1.335 \cdot 10^{-3}$

$$C_0 = 2.916 \times 10^{-14}$$

Вследствие малого значения C_0 , в дальнейшем его можно не учитывать.

Представление функции $\phi(t)$:

$$\phi(t) \cong C_0 + \sum_{k=1}^L \left[\alpha_k \cdot \cos \left(\frac{2\pi \cdot k}{N} t \right) \right] + \sum_{k=1}^L \left[\beta_k \cdot \sin \left(\frac{2\pi \cdot k}{N} t \right) \right]. \quad (14)$$

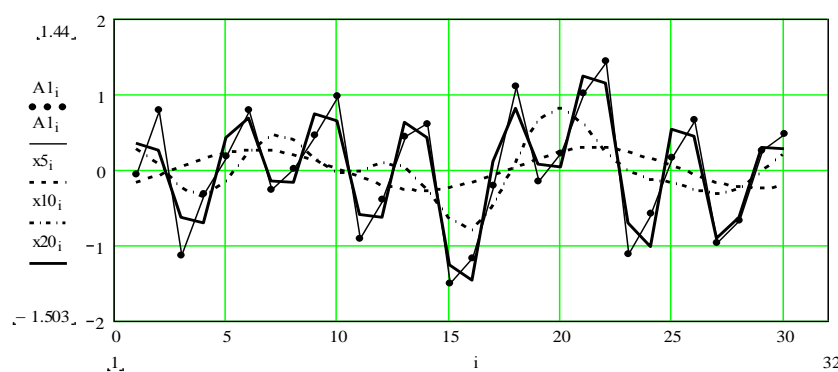


Рис. 8. График циклической составляющей x_5 , x_{10} , x_{20} – количество гармоник (5, 10 или 20 слагаемых), оставленных в разложении (14), i – время

Погрешность вычислений (сумма квадратов отклонений от опытных данных). Наилучшим является приближение с двадцатью гармониками. В дальнейшем расчеты проведены для него.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^i \varepsilon_i^2(t)} = 0,263 \quad (15)$$

Для оценки влияния гармоник различных порядков можно построить амплитудно-частотную характеристику, (для бесконечного количества гармоник ее называют *спектральной плотностью*).

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \gamma \cdot \sin(\omega t + \phi) dt \approx \sum_{k=1}^N \gamma_k \sin\left(\frac{k\pi t}{L} + \phi_k\right) \quad (16)$$

$$\gamma_k = \sqrt{\alpha_k^2 + \beta_k^2}, \quad (17)$$

где γ_k , $k=1,2,\dots$ – амплитудные значения гармоник.

Таблица 2. Вычисленные значения γ_k по формуле (17)

T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
γ	0.019	0.271	0.335	0.141	0.246	0.124	0.596	0.559	0.164	0.078	0.137	0.111	0.052	$4.552 \cdot 10^{-3}$

График $\gamma_k(\omega_k)$, $k=1,2,\dots$, $\omega_k = \frac{k\pi \cdot t}{L}$ имеет вид, представленный на рисунке 9.

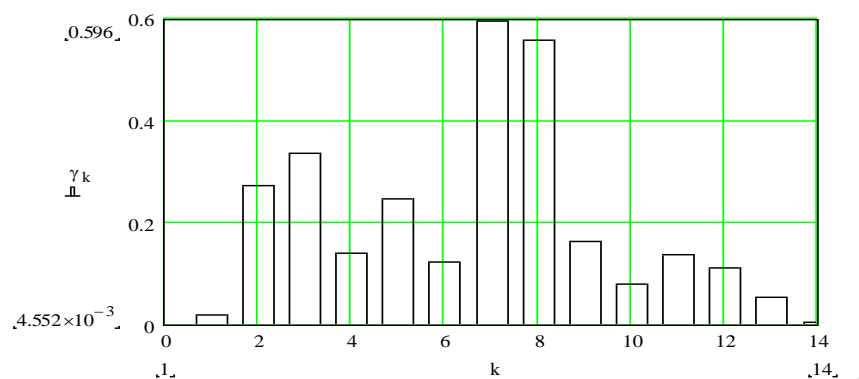


Рис. 9. График $\gamma_k(\omega_k)$, $k=1,2,\dots$, $\omega_k = \frac{k\pi \cdot t}{L}$

Здесь обозначены по горизонтальной оси через k номер частоты.

Из данного графика видно, что наибольшая амплитуда соответствует седьмой частоте, которая равна $\omega_7 = \frac{14 \cdot \pi}{30}$.

В этом случае циклическую составляющую исходного ряда можно выразить формулой:

$$\phi(t) \cong C_0 + \alpha_7 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot 7}{N}t\right) + \beta_7 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot 7}{N}t\right). \quad (18)$$

На рисунке 10 показаны на графике кривые, соответствующие $\phi(t)$ (здесь обозначены: $Al_i = \phi(t), i=t$): и ее аппроксимации

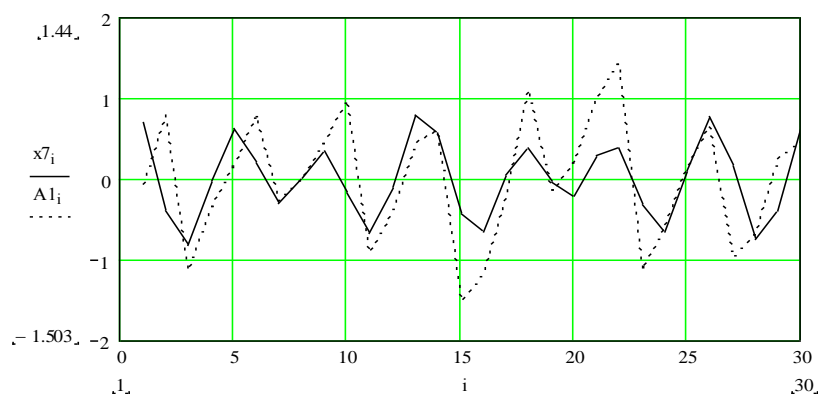


Рис. 10. Кривые, соответствующие $\phi(t)$ по формуле (18)

Погрешность такой аппроксимации $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^i \varepsilon_i^2(t)} = 0,362$.

Объединяя (9) и (13), получим

$$x(t) = 3,511 - 0,859 \cdot t + 0,117 \cdot t^2 - 0,000539 \cdot t^3 - 0,0008 \cdot t^4 C_0 + \sum_{k=1}^{(L-2)/2} \left[\alpha_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot k}{L}t\right) \right] + \sum_{k=1}^{(L-2)/2} \left[\beta_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot k}{L}t\right) \right] + \varepsilon(t) \quad (19)$$

График теоретической кривой и экспериментальных точек (при 15-ти гармониках ряда Фурье) показан на рисунке 11.

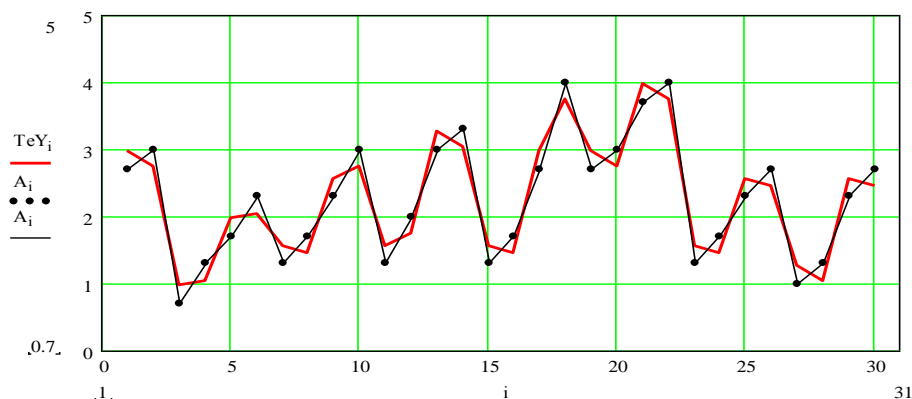


Рис. 11. График теоретической кривой и экспериментальных точек

Красный – вычисления по формуле (18), черный – опытные данные, i – время.

Погрешность модели (18): $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^i \varepsilon_i^2(t)} = 0,263$.

Объединяя (9) и (15), получим (рисунок 12):

$$Xx(t) = 3,511 - 0,859 \cdot t + 0,117 \cdot t^2 - 0,000539 \cdot t^3 - 0,0008 \cdot t^4 C_0 + \\ + 0,455 \cdot \cos\left(\frac{14\pi}{30}t\right) + 0,585 \cdot \sin\left(\frac{14\pi}{30}t\right) + \varepsilon(t) \quad (20)$$

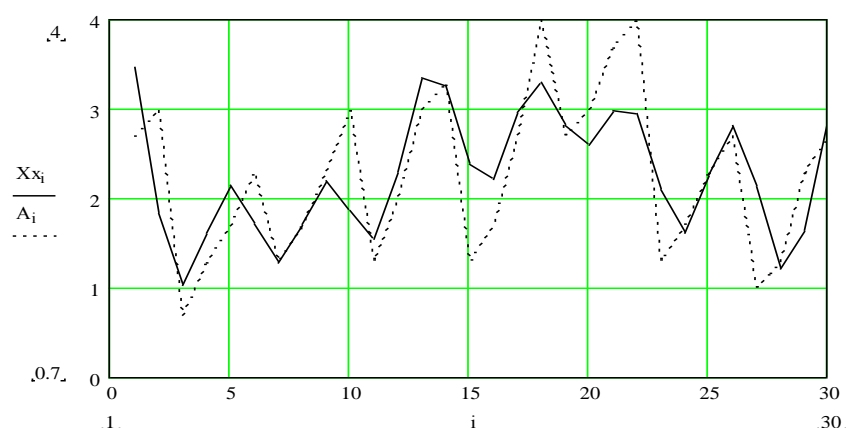


Рис. 12. График теоретической кривой и экспериментальных точек (A – эксперимент, Xx- теоретическая кривая по (18))

Погрешность модели: $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^i \varepsilon_i^2(t)} = 0,519$.

Оценка адекватности. Коэффициент детерминации – это коэффициент, показывающий, какой процент общей изменчивости данных описывается регрессионной моделью. Фактически он оценивает адекватность описания исходным данным. Он вычисляется по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{30} \varepsilon_i^2}{\sum_{i=1}^{30} (x_i - \bar{x})^2}, \quad (21)$$

где $\varepsilon = x(t) - f(t) - \phi(t)$; $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{30} x_i(t)}{30}$ – среднее арифметическое данных.

Для модели (20) $R^2 = 0,664$. Таким образом, модель описывает данные с качеством 66,4%.

Корреляционное отношение $R = \sqrt{R^2}$ – оценивает тесноту нелинейной связи. $R = 0,815$.

Выводы.

1. Изменения количества бактерий в водных технологических средах носит гармонический характер, который определяется условиями их развития и температурными режимами.

2. Опасный характер активного роста бактерий приходится на самые жаркие летние периоды, что особенно опасно, т.к. рабочие в это время работают в неблагоприятных условиях и попадание СОТС в организм вызывают различные заболевания.

3. Основной задачей управления безопасностью СОТС является стабилизация роста бактерий на наименьшем уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Березуцкий В. В. Обеспечение безопасности при применении водных технологических эмульсий и растворов на производствах в металлообрабатывающих технологиях: [монография]/В.В. Березуцкий. – Харьков: Факт, 2009. – 400 с.
2. Сытник К. М., Брайон А. В., Гордецкий А. В., Брайон А. П. Словарь-справочник по экологии. - К.: Наукова думка, 1994. - 664 с.
3. Научно-технические основы применения смазочно - охлажденных жидкостей при резании металлов // Сб.ст. под ред. проф., д.т.н. М. И. Клушина - Иваново, 1968. - 171 с.
4. Бердичевский Е. Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки металлов: Справочник. - М.: Машиностроение, 1984. - 224 с.
5. Кундиев Ю. И., Трахтенберг И. М., Поруцкий Г. В. и др. Гигиена и токсикология смазочно - охлажденных жидкостей. - К.: Здоров'я, 1982. - 120с.
6. Бердичевский Е. Г. Малоотходная технология применения СОЖ в металлообработке // Обзор.- М.:НИИМАШ, 1981,- 64 с.
7. Березуцкий В. В. Екологічні аспекти застосування МОР: навч. посібник - К.:ІЗМН, 1996. - 164 с.
8. С. А. Айвазян. Прикладная статистика. Москва, 2001, "Юнити" - 432 с.
9. Д. К. Монтгомери "Планирование эксперимента и анализ данных" Ленинград "Судостроение" 1980г. - 384 с.
10. В. П. Байбак и др. "Статистична обробка даних" Київ 2001, Видавництво МІВВЦ – 388 с.